

Е. А. ФРИД и С. Х. АЗАРХ

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

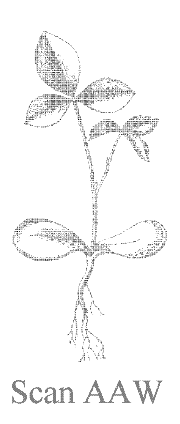
·ЭНЕРГИЯ·

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 659

Е. А. ФРИД и С. Х. АЗАРХ

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ





«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1967

Ф88
6Ф3

УДК 621.372.54

Фрид Е. А. и Азарх С. Х.

Ф88 Пьезокерамические фильтры. М., «Энергия», 1967.

40 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 659.)

В брошюре рассмотрены принцип действия, конструкция и технология изготовления пьезокерамических резонаторов и фильтров для радиоэлектронной аппаратуры. Приводятся некоторые примеры использования фильтров в радиотехнических схемах, излагаются соображения по перспективе развития пьезокерамических фильтров.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
308-67

6Ф3

Фрид Евгений Абрамович
и Азарх Соломон Хацкелевич

Пьезокерамические фильтры

Редактор *Е. Г. Бронникова*
Художественный редактор *Н. П. Стрельцов*
Технический редактор *В. В. Зеркаленкова*
Корректор *Л. К. Голышева*

Сдано в набор 19/IV 1967 г. Подписано к печати 8/VIII 1967 г. Т-07076
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 2,1 Уч.-изд. л. 2,54
Тираж 30 000 экз. Цена 11 коп. Зак. 190

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В современной радиоэлектронной аппаратуре, особенно в аппаратуре радиосвязи, широко применяются различные по назначению, характеристикам и конструкциям узлы частотной селекции. Роль этих узлов исключительно важна. Хорошо известно, например, что важнейшие качественные показатели радиоприемников, такие как избирательность по соседнему и зеркальному каналам, определяются характеристиками входных контуров и фильтров промежуточной частоты. В генераторах, частотных детекторах и ряде других узлов селективные элементы также играют определяющую роль.

До последнего времени в массовой радиовещательной аппаратуре в качестве селективных узлов применялись почти исключительно электрические *LC*-контуры и многозвенные фильтры на их основе (ФСС). В профессиональной аппаратуре наряду с электрическими используются пьезоэлектрические (преимущественно кварцевые) резонаторы и фильтры, имеющие высокую стабильность и избирательность.

Возрастающие требования к избирательности вынуждают конструкторов радиоаппаратуры увеличивать количество электрических контуров или кварцевых резонаторов в фильтрах и усложнять их конструкцию. В результате высококачественные электрические и кварцевые фильтры оказываются сложными, дорогостоящими и слишком большими по размерам.

Вопрос о создании высококачественных, малогабаритных и экономичных фильтров встал особенно остро в связи с работами по микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры и массовым внедрением ее в различные отрасли народного хозяйства. За последние 10 лет в области создания селективных устройств был достигнут значительный прогресс. Были разработаны и в настоящее время все более широко применяются полосовые электромеханические фильтры, имеющие высокую избирательность, хорошую стабильность и значительно меньшие размеры, чем кварцевые фильтры. Однако эти фильтры пока сложны и дороги в изготовлении, что препятствует их использованию в аппаратуре широкого применения.

В связи с успехами в поиске и разработке стабильных пьезокерамических материалов появилось новое, весьма перспективное направление по созданию высококачественных, миниатюрных и недорогих узлов частотной селекции, в которых использованы пьезокерамические резонаторы.

По принципу действия и способам использования пьезокерамические резонаторы аналогичны кварцевым. Как и кварцевые, они могут выполнять функции последовательного или параллельного

колебательного контура и селективного элемента пьезоэлектрического (пьезокерамического) фильтра. В отличие от кварцевых пьезокерамические резонаторы более просты в изготовлении, хорошо согласуются с транзисторными схемами, позволяют получить широкополосные фильтры без использования дополнительных элементов, имеют малые размеры, допускают простые способы монтажа и крепления. Благодаря этим преимуществам пьезокерамические резонаторы и фильтры уже применяются в массовой радиовещательной аппаратуре в качестве селективных элементов трактов промежуточной частоты.

На основе керамических резонаторов с механическими связями возможно создание миниатюрных пьезомеханических фильтров, сопрягающихся с пленочными и интегральными конструкциями аппаратуры. Эта возможность выглядит особенно ценной, если учесть, что проблема создания миниатюрных селективных узлов для этих видов аппаратуры еще недавно казалась неразрешимой.

Разработка пьезокерамических фильтров активно ведется как в нашей стране, так и за рубежом. В разработке отечественных пьезокерамических материалов, технологии их обработки и создании конструкций резонаторов и фильтров большую роль сыграли работы Е. Г. Бронниковой, И. А. Глозмана, П. О. Грибовского, Е. Г. Смажевской, Л. З. Русакова и ряда других авторов.

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

В 1880 г французские физики братья Пьер и Жак Кюри открыли пьезоэлектрический эффект. Они обнаружили, что при помещении груза на поверхность некоторых кристаллов (кварца, турмалина и др.), на ней появляются электрические заряды. Вслед за этим ученые предсказали и обнаружили и обратное явление — возникновение в этих же кристаллах упругих деформаций и механических напряжений под действием внешнего электрического поля. Первое из этих явлений получило название прямого, а второе — обратного пьезоэффекта.

Сущность пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что механическая деформация кристаллической решетки некоторых веществ, имеющих дипольную структуру, вызывает изменение величины и ориентации элементарных диполей, что в свою очередь приводит к изменению суммарного дипольного момента и появлению электрических зарядов на поверхности кристалла. Со временем было установлено, что пьезоэлектрический эффект может наблюдаться не только в кристаллах, но и поликристаллических веществах. В отличие от кристаллов пьезоэффект в поликристаллических веществах-сегнетоэлектриках проявляется только после их поляризации, т. е. после воздействия на них внешнего постоянного электрического поля с напряженностью, достаточной для ориентации большинства элементарных диполей в направлении поля. К таким «поляризуемым» поликристаллическим веществам относятся сегнетоэлектрические керамики (пьезокерамики) титаната бария, твердых растворов титанатов бария и кальция, цирконата-титаната свинца и ряд других.

Пьезокерамические материалы приготовляются обычно из окислов или углекислых солей соответствующих металлов, которые под действием высокой температуры образуют материал с кристаллической структурой. Этот материал измельчается, смешивается с пластификаторами, а затем отливается или прессуется в изделия необходимой конфигурации. Обожженные изделия шлифуются, после чего на них методом вжигания серебра из специальных паст, химической металлизации или напыления в вакууме наносятся электроды. После металлизации изделия поляризуются, что придает им пьезоэлектрические свойства.

Пьезокерамические материалы имеют ряд преимуществ перед пьезокристаллами и, в частности, перед кварцем. Одно из них заключается в том, что изготовление изделий по керамической технологии обеспечивает получение пьезоэлементов сложных геометрических форм с достаточно жесткими допусками на размеры, что

существенно упрощает процесс механической обработки. Как правило, производство изделий из пьезокерамики значительно дешевле производства изделий из кварца и других пьезокристаллов. Другое преимущество состоит в том, что пьезокерамические материалы обеспечивают преобразование значительно большей части подводимой энергии в другую форму (электрической энергии в механическую или наоборот). Это позволяет получить пьезокерамические фильтры с широкими полосами пропускания без применения дополнительных элементов (например, катушек индуктивности).

Пьезокерамические материалы имеют высокие значения диэлектрической проницаемости, позволяющие получать фильтры, хорошо согласующиеся с транзисторными схемами в диапазоне частот 200—3 000 *кгц*. Кварцевые фильтры этого диапазона обычно требуют применения согласующих трансформаторов. Следует также отметить высокую механическую прочность керамических материалов и их устойчивость к внешним воздействиям. Недостатком пьезокерамических материалов, существенным для применения в фильтрах, является более низкая по сравнению с кварцем температурная и временная стабильность свойств и более высокие потери.

Рассмотрим некоторые наиболее важные с точки зрения применения в фильтрах параметры пьезокерамических материалов.

Преобразование энергии из одного вида в другой характеризуется коэффициентом электромеханической связи, квадрат которого равен отношению генерируемой электрической энергии к подводимой механической энергии (в случае прямого пьезоэффекта) или отношению генерируемой механической энергии к подводимой электрической энергии (в случае обратного пьезоэффекта). С точки зрения применения в фильтрах этот параметр определяет возможную ширину полосы пропускания фильтра. Коэффициент электромеханической связи зависит как от свойств материала, так и от направлений, в которых подводится и снимается энергия. Поэтому каждый материал может характеризоваться несколькими такими коэффициентами в зависимости от вида преобразования. Так, например, коэффициент k_{33} характеризует степень преобразования энергии возбуждающего электрического поля, направленного по оси поляризации, в энергию продольной деформации в том же направлении; коэффициент k_{31} характеризует степень преобразования энергии того же поля в энергию деформации, перпендикулярной направлению поля, а коэффициент k_p — в энергию радиальной деформации, направление которой также перпендикулярно возбуждающему полю.

Другим параметром материала является диэлектрическая проницаемость ε. Она определяет полное сопротивление пьезоэлемента, а у фильтров — сопротивление нагрузки. На диэлектрическую проницаемость оказывает влияние направление поляризации и возбуждения.

Добротность материала Q характеризует потери энергии в материале на внутреннее трение. Она определяет эффективную ширину полосы пропускания, вносимое затухание и некоторые другие параметры частотной характеристики фильтра.

Важным параметром материала является скорость распространения в нем упругих механических волн (скорость звука). По отношению к резонаторам чаще пользуются параметром, зависящим от скорости звука, называемым частотной постоянной.

Частотная постоянная N зависит от типа колебаний, возбуждаемых в пьезоэлементе. Она равна произведению линейного размера

Таблица 1

Пьезоэлектрик	Плотность, $г/см^3$	Коэффициенты электромеханической связи		Диэлектрическая проницаемость ε_{33}^{T}	Добротность Q	Частотная постоянная для бруска N_l, $кгц \cdot см$	Уход N_l в диапазоне температур от —60 до +85°C, %	Уход N_l за 10 лет, %	Температура Кюри $t_к$, °C
		k_{31}	k_{33}						
Титанат бария	5,7	0,21	0,50	1 700	300	220	19	1,1	115
Титанат бария, кальция и свинца	5,4	0,11	0,34	450	1 200	243	2,0	0,8	140
Ниобат бария и свинца КНБС-47	5,5	0,15	—	1 800	300	201	1,5	0,6	260
Цирконат-титанат свинца ЦТС-60в	7,3	0,18	—	700	400	180	0,45	0,35	305
Цирконат-титанат свинца PZT-6A	7,4	0,25	0,54	1 050	450	177	0,2	0,1	335
Кварц (данные для срезов, применяемых при возбуждении продольных колебаний по длине бруска)	2,65	0,07—0,09	—	4,7	$(30—50) \cdot 10^3$	230—280	$<0,05$	$<0,05$	Температура $\alpha=\beta$ перехода 573

пьезоэлемента на резонансную частоту колебаний, определяемую этим размером.

Пьезокерамические материалы характеризуются также температурой Кюри $t_к$, при достижении которой тепловое движение молекул разрушает дипольную структуру материала и пьезоэлектрические свойства исчезают.

В табл. 1 приведены параметры некоторых пьезокерамических материалов и для сравнения — параметры кварца.

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Воздействуя на пьезокерамический резонатор переменным электрическим напряжением определенной частоты, в нем можно возбудить резонансные механические колебания. При включении в электрическую цепь пьезокерамический резонатор ведет себя (аналогично кварцевому резонатору) как последовательно-параллельный колебательный контур, показанный на рис. 1. Элементы этого эквивалентного контура отражают свойства резонатора как электромеханической системы. Так, сопротивление R отражает потери, обусловленные внутренним трением в материале, индуктивность L пропорцио-

Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема пьезокерамического резонатора.

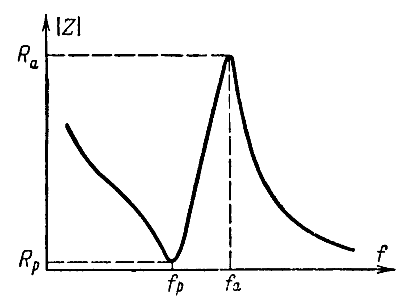


Рис. 2. Зависимость модуля полного сопротивления пьезокерамического резонатора от частоты.

нальна массе, а емкость C обратно пропорциональна механической жесткости материала резонатора. Параллельная емкость C_0 зависит как от геометрической емкости резонатора, так и от коэффициента электромеханической связи. Параметры R, L и C называют динамическим сопротивлением, индуктивностью и емкостью соответственно, а емкость C_0 — статической емкостью резонатора.

Частотно-избирательные свойства резонатора характеризуются зависимостью его сопротивления от частоты. Общий вид зависимости модуля полного сопротивления $|Z|$ резонатора от частоты показан на рис. 2.

На частоте много меньшей, чем резонансная, резонатор является просто конденсатором с емкостью $C_т = C_0 + C$. На частоте, близкой к частоте последовательного резонанса $f_р = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, сопротивление резонатора резко уменьшается, достигая величины $R_р \approx R$. При дальнейшем повышении частоты сопротивление увеличивается до значения $R_а$ на частоте, близкой к частоте параллельного резонанса $f_а = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}}$. Далее сопротивление падает, прибли-

жаясь к величине $\frac{1}{2\pi f C_0}$. Характерными точками рассмотренной зависимости являются частота последовательного резонанса (резонансная частота) $f_р$, частота параллельного резонанса (антирезонансная частота) $f_а$, минимальное $R_р$ и максимальное $R_а$ значения сопротивлений. Важное значение имеет также разность антирезонансной и резонансной частот $\Delta f = f_а - f_р$, называемая резонансным промежутком резонатора. Величина относительного резонансного промежутка $\Delta f / f_р$ определяет возможную ширину полосы пропускания фильтра. Из выражений для резонансной и антирезонансной частот нетрудно получить следующее соотношение для емкостей C и C_0:

$$\frac{C}{C_0} = K^2_{эфф} = \frac{f_а^2 - f_р^2}{f_р^2} = \frac{2f_р + \Delta f}{f_р^2}\Delta f.$$

Обычно $\Delta f \ll f_р$, тогда

$$\frac{C}{C_0} \approx \frac{2\Delta f}{f_р}.$$

Рис. 3. Зависимость реактивной составляющей сопротивления пьезокерамического резонатора от частоты.

Выражение $\sqrt{\frac{C}{C_0}} = K_{эфф}$ называется эффективным коэффициентом электромеханической связи. Этот коэффициент связан с упомянутыми выше коэффициентами электромеханической связи пьезокерамического материала k_{31}, k_{33} или другими.

Полное сопротивление резонатора можно вычислить по формуле

$$Z = j\frac{1}{2\pi f C_0}\,\frac{1 + jQ\left(\frac{f}{f_р} - \frac{f_р}{f}\right)}{1 + jQ\frac{f_а}{f_р}\left(\frac{f_а}{f_р} - \frac{f}{f_а}\right)},$$

где $Q = \frac{2\pi f_р L}{R}$ — добротность резонатора.

Зависимость реактивной составляющей сопротивления резонатора от частоты показана на рис. 3. Из этой зависимости хорошо видно, что на частотах ниже $f_р$ и выше $f_а$ сопротивление резонатора имеет емкостный характер, а в пределах резонансного промежутка (между $f_р$ и $f_а$) — индуктивный характер. На частотах $f_р$ и $f_а$ реактивная составляющая сопротивления равна нулю и резонатор представляет собой активное сопротивление $R_р$ и $R_а$.

Если добротность резонатора достаточно высока $\left(Q \gg \frac{f_р}{\Delta f}\right)$, то при решении ряда вопросов можно пренебречь активными потерями, полагая $R=0$. В этом случае сопротивление резонатора является чисто реактивным и его зависимость от частоты принимает вид, показанный на рис. 4. Как видно, сопротивление резонатора на ре-

зонансной частоте равно нулю, а на антирезонансной частоте бесконечно велико. Сопротивление резонатора вычисляется по формуле

$$Z = jX = j\frac{1}{2\pi f C_0}\frac{f^2 - f_p^2}{f_a^2 - f^2}.$$

Все параметры резонатора и его эквивалентной схемы можно определить. Параметры f_p, f_a, $C^т$ и R легко измеряются. Параметры L, C, C_0 и добротность Q нетрудно вычислить, исходя из результатов этих измерений. Вычисление производится по следующим формулам:

статическая емкость

$$C_0 \approx C^т\left(1 - \frac{2\Delta f}{f_г}\right);$$

динамическая емкость

$$C \approx C^т\frac{2\Delta f}{f_p};$$

добротность

$$Q \approx \frac{8\cdot 10^7}{\Delta f C^т R};$$

динамическая индуктивность

$$L \approx \frac{12{,}6\ 10^6}{f_p\,\Delta f C^т}.$$

В приведенных формулах для Q и L частоты Δf и f_p выражены в килогерцах, сопротивление R — в омах, емкость $C^т$ — в пикофарадах. Индуктивность вычисляется в миллигенри.

Рассмотрим кратко способы измерения параметров f_p, f_a, R — и $C^т$.

Резонансную частоту резонатора с достаточной для практики точностью можно измерить по схеме рис. 5. Генератор стандартных сигналов *ГСС* с внутренним сопротивлением R_i подключается к цепи, состоящей из резонатора $П_э$ и дополнительного резистора $R_д$. На резонансной частоте сопротивление резонатора принимает наименьшее значение, при этом ток в цепи резонатора и напряжение на резисторе $R_д$ резко возрастают. Таким образом, резонансная частота фиксируется по максимальному отклонению стрелки вольтметра. Частота отсчитывается по шкале генератора или частотомера *ИЧ*. Сопротивления R_i и $R_д$ снижают добротность резонатора и

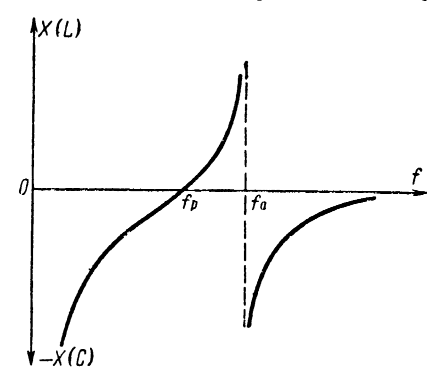


Рис. 4. Зависимость сопротивления пьезокерамического резонатора от частоты при отсутствии потерь.

точность измерений. Поэтому желательно, чтобы суммарное сопротивление $R_i+R_д$ было в несколько раз меньше сопротивления резонатора на резонансной частоте. Для уменьшения внутреннего сопротивления генератора целесообразно применять делители напряжения на активных сопротивлениях. Сопротивление резистора $R_д$ следует брать возможно меньшим, насколько это позволяет чувствительность вольтметра.

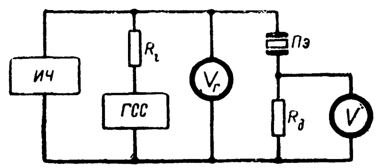


Рис. 5. Схема измерения резонансной частоты пьезокерамического резонатора.

При измерении резонансной частоты можно одновременно вычислить сопротивление резонатора по формуле

$$R \approx \frac{U_г - U_в}{U_в} R_д,$$

где $U_г$ — напряжение на выходе генератора, $U_в$ — максимальное значение напряжения на сопротивлении $R_д$. Более точный метод измерения сопротивления R состоит в замещении резонатора активным сопротивлением на частоте резонанса. Замещающее сопротивление подбирается так, чтобы показания вольтметра не изменялись. Величина подобранного сопротивления равна R.

Схему, показанную на рис. 5, можно применять и для измерения антирезонансной частоты, по минимальному показанию вольтметра. При этом, однако, возможны ошибки, обусловленные наличием высших гармонических составляющих в сигнале генератора. Эти ошибки исключаются лишь при использовании селективного вольтметра. Чаще антирезонансную частоту измеряют по схеме на рис. 6. Сопротивление дополнительного резистора $R_д$ в этом случае должно в несколько раз превышать сопротивление резонатора на антирезонансной частоте. Антирезонансная частота фиксируется по максимальному показанию вольтметра.

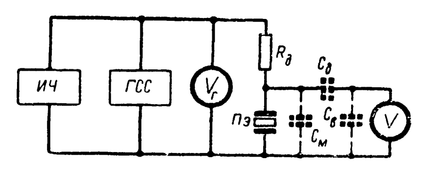


Рис. 6. Схема измерения антирезонансной частоты пьезокерамического резонатора.

При проведении измерений по схеме на рис. 6 особое внимание следует обратить на то, чтобы внешняя емкость, подключаемая параллельно резонатору (емкость монтажа $C_м$, входная емкость вольтметра $C_в$, показанные на рис. 6 пунктиром), была невелика. Общая внешняя емкость $C_м+C_в$ должна быть в 50—100 раз меньше емкости резонатора $C^т$. В тех случаях, когда емкости резонатора и монтажа сравнимы по величине, в результаты измерения следует ввести поправку. Если емкость резонатора обозначить $C^т$, общую внешнюю емкость — $C_{вн}$ и измеренную по максимуму показаний вольтметра антирезонансную частоту — $f'_а$, то истинное значение антирезонансной частоты $f_а$ с достаточной для практики точностью определяется из выражения

$$f_а \approx f'_а + \frac{C_{вн}}{C^т}(f'_а - f_р),$$

где $f_р$ — резонансная частота резонатора.

Чтобы уменьшить влияние входной емкости вольтметра на результаты измерений, последовательно с вольтметром целесообразно подключить конденсатор малой емкости $C_{д}$.

Геометрическую емкость резонатора $C^{т}$ можно измерять на любом мосте для измерения емкостей, учитывая лишь, что частота питания моста должна быть значительно ниже, чем резонансная частота резонатора.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к пьезокерамическим резонаторам, является моночастотность резонансной характеристики. Это означает, что резонатор не должен иметь побочных резонансных колебаний в достаточно широком диапазоне частот в окрестности используемых резонансных колебаний. Так, для резонатора, применяемого в фильтре промежуточной частоты радиоприемника, этот диапазон должен в несколько раз превышать ширину полосы пропускания входных контуров. Например, при промежуточной частоте 465 *кгц*, приеме сигналов в 30-метровом диапазоне и добротности входного контура около 100 диапазон частот, свободный от побочных резонансов, должен охватывать область частот примерно от 150 до 750 *кгц*.

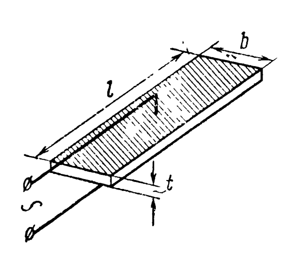


Рис. 7. Резонатор в виде прямоугольного бруска.

Для подавления побочных резонансных колебаний и выделения основных приходится тщательно подбирать форму и линейные размеры резонаторов, конфигурацию электродов, направления поляризации и возбуждения и способ крепления. Резонатору, как и любой другой системе с распределенными параметрами, свойственны обертонные колебания на более высоких частотах. Поэтому при выборе линейных размеров резонаторов необходимо следить, чтобы обертоны колебаний не попадали в район частоты основного колебания. Все это приводит к серьезным трудностям при разработке новых типов резонаторов.

Остановимся кратко на некоторых конструкциях пьезокерамических резонаторов.

Одной из часто встречающихся конструкций резонаторов является прямоугольный брусок из пьезокерамического материала длиной l, шириной b и толщиной t (рис. 7) с металлизированными поверхностями (электродами). Воздействием постоянного электрического напряжения, приложенного к электродам, брусок поляризуется в направлении толщины. Если к электродам поляризованного бруска подвести переменное напряжение с частотой $f_{р}$, близкой к $v/2l$, где v — скорость распространения звука в материале, то в бруске возбудятся резонансные колебания по длине. Длина бруска обычно значительно превышает ширину и толщину. В этом случае частота основного тона колебаний по длине существенно отличается от резонансных частот колебаний по ширине и толщине и резонатор оказывается моночастотным в довольно широком диапазоне частот.

При резонансных колебаниях по длине короткие торцы бруска испытывают наибольшие смещения, а его среднее сечение остается неподвижным. Как известно, неподвижные точки, линии или поверхности, образующиеся при резонансных колебаниях резонаторов, на-

зываются узловыми. В этих местах резонатор можно закрепить или зажать между пружинящими контактами, не вызывая дополнительных потерь энергии и не нарушая моночастотности. Таким образом, у бруска контактные устройства можно располагать по периметру среднего сечения.

Зная геометрические размеры бруска и параметры пьезокерамического материала, из которого он изготовлен (см. табл. 1), можно подсчитать резонансную частоту $f_р$, относительную величину резонансного промежутка $\Delta f/f_р$ и эквивалентную параллельную емкость C_0 по формулам:

$$f_р = \frac{N_l}{l};$$

$$\frac{\Delta f}{f_р} \approx 0{,}4k_{31}^2;$$

$$C_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-3} \varepsilon_{33}^{т} \frac{bl}{t} (1 - k_{31}^2).$$

В этих и приводимых ниже формулах размеры берутся в миллиметрах, емкость вычисляется в пикофарадах, резонансная частота — в килогерцах. Если емкость резонатора известна (по измерениям на низкой частоте) и равна $C^т$, то

$$C_0 = C^т (1 - k_{31}^2).$$

По уравнениям, приведенным выше, можно вычислить динамические индуктивность L и емкость C эквивалентной схемы.

В ряде случаев применяется не полная, а частичная металлизация поверхностей бруска. При этом его резонансная частота мало изменяется, индуктивность L возрастает, а емкости C и C_0 уменьшаются. С уменьшением площади электродов эффективный коэффициент электромеханической связи сначала несколько возрастает, а затем уменьшается.

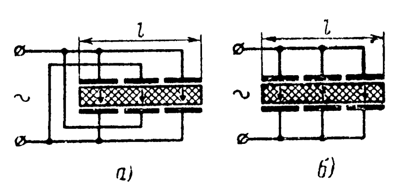


Рис. 8. Расположение и коммутация электродов бруска при возбуждении резонансных колебаний на частоте первого обертона.

а — при поляризации участков бруска в одном направлении; *б* — при поляризации участков бруска в противоположных направлениях (стрелками показаны направления поляризации).

Как отмечалось выше, пьезокерамическим резонаторам свойственны колебания на частотах более высоких, чем частота основного тона (обертонные колебания). В бруске нетрудно возбудить резонансные колебания на частотах, в 3, 5 и т. д. раз больших, чем основная. При этом на длине бруска укладывается 3, 5 и т. д. полуволн смещений и имеется столько же узловых сечений. В частности, для первого нечетного обертона (частота в 3 раза больше основной) узловые сечения расположены посередине бруска и на расстояниях от концов, примерно равных $^1/_6$ от длины бруска.

При полной металлизации поверхностей бруска резонансные колебания на частоте первого обертона выражены слабо, так как в этом случае внешнее электрическое поле приводит к однородным деформациям элементов бруска (растяжениям либо сжатиям) по всей его длине. При колебаниях на частоте первого обертона одни элементы бруска должны растягиваться, а другие — сжиматься, поэтому для активного проявления колебаний электроды бруска разделяются на три части (образуя среднюю и крайние пары электродов) и напряжение на средние электроды подается в противофазе по отношению к напряжению на крайних электродах (рис. 8,*а*). Линии разделения электродов находятся в местах наибольших смещений. На каждую подобную линию одна пара электродов оказывает выталкивающее, а соседняя — втягивающее действие. Контактные зажимы, подводящие электрические напряжения к электродам, располагаются в узлах колебаний.

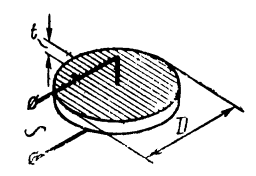


Рис. 9. Дисковый пьезокерамический резонатор.

В ряде случаев целесообразно, чтобы все три контакта, подводящие напряжения к одной стороне бруска, не были изолированы друг от друга и находились под одним напряжением. Это можно осуществить, если поляризовать средний и крайние участки бруска в противоположных направлениях (рис. 8,*б*).

При резонансных колебаниях на частотах обертонов эквивалентная динамическая индуктивность резонатора не меняется, эквивалентная динамическая емкость и коэффициент электромеханической связи уменьшаются.

Широкое распространение получили пьезокерамические резонаторы в форме диска (рис. 9). Они применяются, в частности, для изготовления фильтров промежуточной частоты радиоприемников на частотах 450—500 *кгц*.

На плоские поверхности диска наносятся электроды, которые служат как для поляризации диска, так и для возбуждения резонансных колебаний. При возбуждении дискового резонатора переменным электрическим полем в нем возникают радиальные колебания, при которых диск попеременно растягивается и сжимается в направлении от центра к краю. Диаметр диска обычно в 4 раза и более превышает толщину, что обеспечивает моночастотность резонатора в достаточно широкой полосе частот.

При радиальных колебаниях диска точки наибольших смещений находятся на его краях. Узел колебаний расположен в центре диска. Здесь диск можно закрепить или зажать между подводящими напряжение контактами.

Частотная постоянная для основного тона радиальных колебаний диска $N_{р}=f_{р}D$ примерно в 1,35 раза больше частотной постоянной для продольных колебаний по длине бруска N_l (см. табл. 1). Отсюда резонансная частота диска определяется из выражения

$$f_{р} \approx \frac{1{,}35\,N_l}{D}.$$

Дисковые резонаторы на частоты 450—500 *кгц* имеют небольшие размеры, позволяющие создавать малогабаритные конструкции фильтров. Так, например, резонатор, изготовленный из пьезокерами-

ческого материала ЦТС-60в на частоту 465 *кгц*, имеет диаметр

$$D \approx \frac{1,35 N_l}{f_p} = \frac{1,35 \cdot 1\,800}{465} = 5,25 \text{ мм.}$$

Относительную величину резонансного промежутка и эквивалентную параллельную емкость дискового резонатора можно вычислить по формулам:

$$\frac{\Delta f}{f_p} \approx 1,16\, k_{31}^2,$$

$$C_0 = 8,85 \cdot 10^{-3} \varepsilon_{33}^{T} (1 - 2,86\, k_{31}^2) \frac{\pi D^2}{4t}.$$

Статическая и динамическая емкости, динамическая индуктивность и сопротивление дисковых резонаторов на резонансной частоте зависят от площади электродов, толщины диска и констант материала. Значения параметров дисковых резонаторов на частотах 450—500 *кгц* находятся обычно в следующих пределах: $C_0 = 150 \div 800$ *пф*; $L = 2 \div 20$ *мгн*; $C = 20 \div 100$ *пф*; $R = 10 \div 100$ *ом*; $Q = 300 \div 500$.

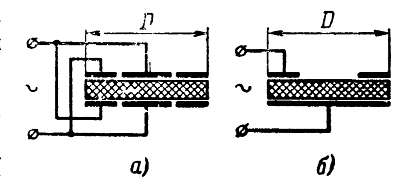


Рис. 10. Основной (*а*) и упрощенный (*б*) варианты расположения электродов дискового резонатора при возбуждении колебаний на частоте первого обертона.

Как и бруску, диску свойственны обертонные колебания на высших частотах. В отличие от бруска частоты этих колебаний не являются кратными частоте основного тона колебаний. Так, частота первого обертона примерно в 2,6 раза, а частота второго в 4,2 раза выше частоты основного тона колебаний. При обертонных колебаниях, кроме узловой точки, в центре диска появляются и узловые окружности. Диаметр узловой окружности, возникающей при колебаниях на частоте первого обертона, составляет примерно 0,7 от диаметра диска.

Для возбуждения диска на частоте первого обертона его электроды разделяются на центральный и кольцевой (рис. 10,*а*). Окружность раздела электродов проходит в точках наибольших смещений элементов диска. Диаметр этой окружности составляет примерно 0,45 от диаметра диска.

Для упрощения конструкции контактных устройств часто применяется более простая система электродов, показанная на рис. 10,*б*. В этом случае одна плоскость диска металлизируется полностью, а на вторую наносится только кольцевой электрод.

Повышение резонансной частоты резонаторов свыше 1 *Мгц* при использовании колебаний по длине бруска или радиальных колебаний диска приводит к резкому уменьшению габаритов резонаторов. Конструктивно и технологически такие резонаторы оказываются малопригодными для использования в конструкциях фильтров. Для повышения частоты у бруска можно было бы использовать продольные колебания по толщине. Однако в этом случае труднее обеспечить моночастотность резонатора, так как в окрестности

основной частоты появляются обертоны колебаний по длине и ширине бруска, а также колебания других типов.

Для диапазона частот 1—3 *Мгц* оказались пригодными пьезокерамические резонаторы в виде кольца (рис. 11), колеблющиеся по толщине. Электроды для поляризации и возбуждения резонаторов наносятся на плоские поверхности (торцы) кольца. При соотношении размеров b/h в пределах от 0,4 до 0,7 и при не слишком больших диаметрах $[D<(4\div 6)h]$ кольцевой резонатор оказывается моночастотным в достаточно широкой полосе частот. При резонансных колебаниях кольцо попеременно растягивается и сжимается в направлениях толщины. На частоте основного тона этих колебаний в кольце образуется одна узловая поверхность (среднее сечение кольца).

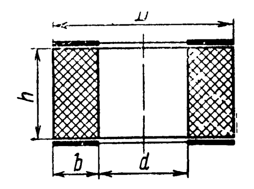


Рис. 11. Кольцевой пьезокерамический резонатор.

Резонансная частота основного тона колебаний по толщине кольца приближенно вычисляется по формуле

$$f_{\text{р}} \approx \frac{N_l}{h}.$$

Относительную величину резонансного промежутка и статическую емкость резонатора можно оценить по формулам:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{р}}} \approx 0{,}4 \cdot k_{33}^2;$$

$$C_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-3} \varepsilon_{33}^{T} (1 - k_{33}^2) \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4h}.$$

Аналогично резонаторам других форм в кольце можно возбудить обертонные колебания. Резонансные частоты обертонов находятся в сложной зависимости от коэффициентов электромеханической связи материала. При коэффициенте связи, близком к нулю, резонансная частота первого обертона в 3 раза выше частоты основного тона. При увеличении коэффициента связи отношение этих частот возрастает и составляет, например, 3,6 при коэффициенте связи, равном 0,6.

Особенность конструкции кольцевого резонатора заключается также в том, что на его электродах отсутствуют узловые точки или линии. Однако это не исключает возможности применения контактной системы. Опыт показал, что использование контактов в виде плоских шайб с точечными выступами не приводит к значительному увеличению потерь и нарушению моночастотности резонатора.

СХЕМЫ И КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Для построения многозвенных электрических фильтров используются в основном мостовые, дифференциально-мостовые и лестничные схемы. Эти же схемы могут применяться для фильтров с кварцевыми или пьезокерамическими резонаторами. Вместе с тем существенные различия в параметрах и стоимости пьезокерамических и кварцевых резонаторов обусловливают разный подход к выбору схем. Поскольку в кварцевых фильтрах применяются дорогостоящие резонаторы и в ряде случаев используются согласующие трансфор-

маторы, катушки индуктивности и конденсаторы, то их целесообразнее выполнять по более экономичным с точки зрения количества элементов мостовым и особенно дифференциально-мостовым схемам. Для пьезокерамических фильтров, в которых обычно отсутствуют дополнительные элементы и применяются лишь недорогие миниатюрные резонаторы, чаще используются более простые, лестничные схемы, позволяющие получить малогабаритные фильтры даже при большом числе резонаторов. Ниже рассматриваются пьезокерамические фильтры, выполненные по лестничным схемам с регулярной (повторяющейся) структурой.

Основой таких фильтров служит Г-образное звено, схема которого показана на рис. 12. Параллельная и последовательная ветви звена имеют полные сопротивления Z_1 и Z_2. Со стороны входа и выхода звено имеет различные характеристические сопротивления $Z_п$ и $Z_т$.

Рис. 12. Схема Г-образного звена фильтра.

Многозвенные цепочечные фильтры строятся путем согласованного соединения звеньев, которое получается при условии, что характеристическое сопротивление со стороны выхода предшествую-

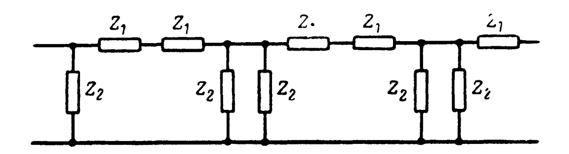


Рис. 13. Согласованное соединение Г-образных звеньев в лестничную схему фильтра.

щего звена равно харктеристическому сопротивлению со стороны входа последующего звена. Таким образом, ветви Г-образных звеньев соединяются друг с другом, как показано на рис. 13. При этом сопротивления ветвей объединяются, вследствие чего схема многозвенного фильтра принимает вид, показанный на рис. 14. Око-

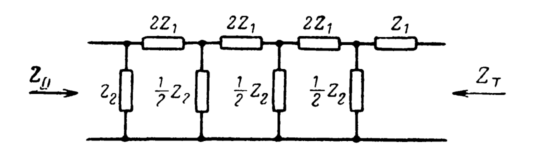


Рис. 14. Схема многозвенного лестничного фильтра с регулярной структурой.

нечными ветвями фильтра могут быть как последовательные, так и параллельные ветви. Как видно из рис. 14, сопротивления оконечных ветвей должны отличаться в 2 раза от сопротивлений остальный ветвей фильтра. Пьезокерамические фильтры обычно состоят только из пьезокерамических резонаторов; иногда в последовательных или параллельных ветвях вместо резонаторов используют кон-

денсаторы. В ряде случаев применяются также параллельные или последовательные соединения резонаторов и конденсаторов.

Из теории фильтров известно, что затухание a и характеристические сопротивления $Z_{\text{п}}$ и $Z_{\text{т}}$ Г-образного звена без учета потерь в элементах определяются из уравнений:

$$a=0 \quad \text{при} \quad -1 \leqslant \frac{X_1}{X_2} \leqslant 0;$$

$$a=\operatorname{arch}\sqrt{-\frac{X_1}{X_2}} \quad \text{при} \quad -\infty < \frac{X_1}{X_2} \leqslant -1;$$

$$a=\operatorname{arsh}\sqrt{\frac{X_1}{X_2}} \quad \text{при} \quad 0 \leqslant \frac{X_1}{X_2} < \infty;$$

$$Z_{\text{п}}=\sqrt{-X_1X_2}\,\frac{1}{\sqrt{1+\frac{X_1}{X_2}}};$$

$$Z_{\text{т}}=\sqrt{-X_1X_2}\,\sqrt{1+\frac{X_1}{X_2}},$$

где X_1 и X_2 — реактивные сопротивления последовательной и параллельной ветвей звена. В области частот, где отсутствует затухание (при $a=0$), звено имеет полосу пропускания, ограниченную частотами среза f_{c1} и f_{c2}. Характеристика звена может иметь пики (полюсы) бесконечного затухания, расположенные с одной или с обеих сторон от полосы пропускания.

Полоса пропускания многозвенного фильтра равна полосе пропускания звена; затухание фильтра равно сумме затуханий составляющих его звеньев.

Наибольшее распространение получили пьезокерамические фильтры, состоящие только из резонаторов. Как показано выше, сопротивление пьезокерамического резонатора без учета потерь имеет вид:

$$Z=jX=j\frac{1}{2\pi fC_0}\,\frac{f^2-f_{\text{p}}^2}{f_{\text{a}}^2-f^2}.$$

Сопротивления резонаторов, расположенных в последовательной и параллельной ветвях звена фильтра, равны соответственно:

$$Z_1=jX_1=j\frac{1}{2\pi fC_{01}}\,\frac{f^2-f_{\text{p1}}^2}{f_{\text{a1}}^2-f^2},$$

$$Z_2=jX_2=j\frac{1}{2\pi fC_{02}}\,\frac{f^2-f_{\text{p2}}^2}{f_{\text{a2}}^2-f^2}.$$

Зависимость сопротивлений X_1 и X_2 от частоты показана на рис. 15,*а*. Характеристика затухания звена имеет вид, показанный на рис. 15,*б*. Полоса пропускания звена расположена между частотами f_{c1} и f_{c2}. Она получается непрерывной, если резонансная частота резонатора,

расположенного в последовательной ветви, совпадает с антирезонансной частотой резонатора, расположенного в параллельной ветви ($f_{p1}=f_{a2}=f_0$). Характеристика звена имеет полюсы затухания на частотах $f_{\infty 1}=f_{a1}$ и $f_{\infty 2}=f_{p2}$, расположенных по обеим сторонам от полосы пропускания. Наличие полюсов затухания легко объясняется. В самом деле, на частоте f_{a1} сопротивление резонатора в последовательной ветви становится очень большим и сигнал через звено не проходит. На частоте f_{p2} сильно уменьшается сопротивление резонатора в параллельной ветви, что также препятствует прохождению сигнала.

Для резонаторов с одинаковыми резонансными промежутками ($\Delta f_1=\Delta f_2=\Delta f$) частоты среза f_{c1} и f_{c2} определяются по формулам:

$$f_{c1}\approx f_0-\frac{\Delta f}{\sqrt{1+K}};$$

$$f_{c2}\approx f_0+\frac{\Delta f}{\sqrt{1+K}},$$

где $K=C_{02}/C_{01}$ — отношение статических емкостей резонаторов.

Как видно из этих выражений, частоты среза расположены симметрично относительно частоты f_0. Коэффициент

$$\frac{1}{\sqrt{1+K}}=\frac{f_{\infty 1}-f_{\infty 2}}{f_{c2}-f_{c1}}$$

может служить мерой «прямоугольности» характеристики звена. При K, близком к нулю, частота среза приближается к частотам полюсов затухания и «прямоугольность» характеристики звена возрастает. При увеличении K полоса пропускания сужается и «прямоугольность» характеристики ухудшается. На рис. 16 приведен график, показывающий расположение частот среза f_{c1} и f_{c2} на оси частот в зависимости от отношения емкостей. Так, при $K=3$ частоты среза находятся на расстоянии $\pm 0{,}5\Delta f$ от частоты f_0.

Рис. 15. Зависимость реактивных сопротивлений резонаторов, расположенных в последовательной (X_1) и параллельной (X_2) ветвях фильтра, от частоты (*а*) и частотная характеристика звена при согласованной нагрузке (*б*).

Характеристические сопротивления звена вычисляются из выражений:

$$Z_\text{п}=\frac{1}{2\pi f C_{02}}\sqrt{\frac{K}{1+K}}\,\frac{f^2-f_{\infty 2}^2}{\sqrt{(f^2-f_{c1}^2)(f_{c2}^2-f^2)}},$$

$$Z_\text{т}=\frac{1}{2\pi f C_{01}}\sqrt{\frac{1+K}{K}}\,\frac{\sqrt{(f^2-f_{c1}^2)(f_{c2}^2-f^2)}}{f_{\infty 1}^2-f^2}.$$

На средней частоте полосы пропускания (при $f = f_0$)

$$Z_{\text{п}0} \approx Z_{\text{т}0} \approx \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{C_{01} C_{02}}} = Z_0.$$

Это выражение можно использовать для оценки величин нагрузочных сопротивлений фильтра. Так, если выходное характеристическое сопротивление фильтра равно $Z_{\text{п}}$, то сопротивление нагрузки выбирается равным $\sqrt{2} Z_0$. При выходном характеристическом сопротивлении, равном $Z_{\text{т}}$, фильтр нагружается сопротивлением, равным $\frac{1}{\sqrt{2}} Z_0$.

Затухание характеристики звена вдали от полосы пропускания приближенно определяется соотношением $\operatorname{sh} a \approx \sqrt{K}$. В табл. 2 приведены значения затухания в зависимости от отношения емкостей.

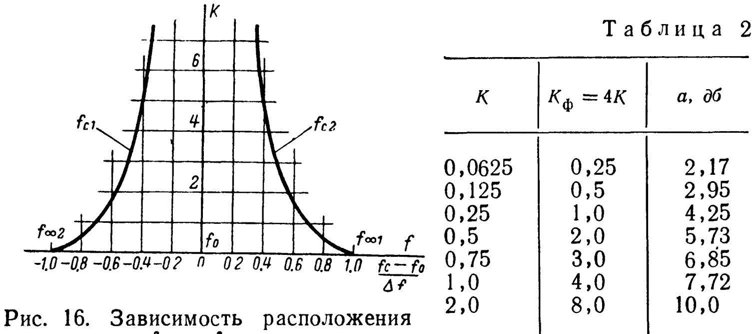


Рис. 16. Зависимость расположения частот среза f_{c1} и f_{c2} от отношения емкостей $K = C_{02}/C_{01}$.

Таблица 2

K	$K_{\text{ф}} = 4K$	a, *дб*
0,0625	0,25	2,17
0,125	0,5	2,95
0,25	1,0	4,25
0,5	2,0	5,73
0,75	3,0	6,85
1,0	4,0	7,72
2,0	8,0	10,0

Наряду с отношением емкостей для Г-образного звена (K) в таблице приводятся соответствующие им значения отношения емкостей в параллельной и последовательной ветвях фильтра ($K_{\text{ф}}$). Из таблицы видно, что с увеличением отношения емкостей затухание характеристики звена вдали от полосы пропускания увеличивается. С помощью таблицы нетрудно оценить число звеньев, необходимое для получения заданного затухания вдали от полосы пропускания фильтра. При этом следует учитывать, что фильтр, содержащий n ветвей, состоит из $n-1$ Г-образных звеньев.

Как видно, увеличение отношения статических емкостей резонаторов (K и $K_{\text{ф}}$), с одной стороны, приводит к увеличению затухания фильтра вдали от полосы пропускания, а с другой стороны, — к ухудшению «прямоугольности», т. е. избирательности фильтра. При выборе величины K необходимо учитывать и возможность конструктивного выполнения соответствующего отношения емкостей. Обычно величина $K_{\text{ф}}$ выбирается в пределах от 1 до 4.

Увеличение затухания на частотах вдали от полосы пропускания с увеличением отношения емкостей легко объясняется. На этих частотах резонаторы ведут себя как обычные конденсаторы и фильтр представляет собой по существу емкостный делитель напряжения. Увеличение K (например, увеличение C_{02}) приводит к увеличению

коэффициента деления напряжения и большему ослаблению сигнала. Помимо звена, состоящего только из резонаторов, иногда применяются звенья с резонатором в одной ветви и конденсатором в другой. В табл. 3 приведены схемы, характеристики и параметры этих звеньев, а также рассмотренного выше двухрезонаторного звена.

Как известно, в реальных условиях отсутствует полное согласование фильтра с генератором и нагрузкой, а элементы фильтра имеют потери. Несогласованность и потери существенно влияют на характеристики фильтров. В частности, наблюдаются появление затухания в полосе пропускания, сглаживание перехода от полосы пропускания к полосе задерживания и неравномерность затухания в полосе пропускания (волнистость характеристики фильтра). На практике обычно пользуются не теоретической шириной полосы пропускания $\Delta f_c = f_{c2} - f_{c1}$, а шириной полосы, отсчитываемой по уровню затухания 3 *дб* (Δf_3) или 6 *дб* (Δf_6). Точный расчет величины Δf_c по заданной ширине полосы Δf_3 или Δf_6 довольно сложен и здесь не рассматривается. Для пьезокерамических резонаторов, имеющих добротность $Q \approx 400 \div 600$, приближенно можно считать, что $\Delta f_c = (1,1 \div 1,6) \Delta f_3$. Затухание на средней частоте полосы пропускания $a_{п0}$ оценивается по формуле $a_{п0} \approx \frac{9 f_0}{Q \Delta f_3}$ *дб* на одно Г-образное звено.

Построение пьзокерамических фильтров требует изготовления резонаторов с заданными значениями резонансной частоты и резонансного промежутка. При изготовлении резонаторов получается определенный разброс этих параметров и возникает необходимость в настройке резонаторов. Настройку одной из частот (резонансной или антирезонансной) можно осуществлять механической подшлифовкой резонатора, а заданное значение резонансного промежутка обеспечивается обычно путем отбора. При этом часть резонаторов не используется. Отсюда ясно, что управление резонансным промежутком имеет важное значение.

Наиболее простым способом изменения резонансного промежутка резонатора является применение параллельного или последовательного соединения резонатора с конденсатором. Этот способ широко применяется при настройке кварцевых фильтров. Применение конденсаторов усложняет конструкцию фильтра, однако дает возможность скорректировать величины резонансных промежутков резонаторов и иногда выполнять фильтры с различными полосами пропускания на основе одних и тех же резонаторов.

Применение в пьезокерамических фильтрах конденсаторов стандартных типов (особенно подстроечных) нельзя считать рациональным, так как при этом размеры фильтров резко возрастают и в ряде случаев уменьшается затухание в полосе задерживания (за счет увеличения числа и протяженности монтажных проводников). Целесообразнее применять малогабаритные конденсаторы, конструктивно сопрягающиеся с резонаторами.

Рассмотрим некоторые параметры звеньев, ветви которых состоят из резонаторов и конденсаторов.

Звено полосового фильтра лестничной схемы можно построить на основе как параллельного, так и последовательного соединений резонаторов и конденсаторов в параллельной и последовательной ветвях. В соответствии с этим существуют четыре разновидности Г-образных звеньев, показанные на рис. 17.

Таблица 3

Схема звена	C_1, Z_T, $Z_П$, $ПЭ_2$	$ПЭ_1$, Z_T, $Z_Г$, C_2	Z_T, $Z_П$, $ПЭ_2$
Частотная характеристика затухания	a, f, $f_{\infty 2}$, f_{c1}, f_C, f_{c2}	a, f, f_{c1}, f_0, f_{c2}, $f_{\infty 1}$	a, f, $f_{\infty 2}$, f_{c1}, f_0, f_{c2}, $f_{\infty 1}$
Сопротивления ветвей	X, X_2, f_{a2}, f, f_{p2}, X_1	X, X_1, f_{p1}, f_{a1}, f, X_2	X, X_1, X_2, f_{p2}, f_{a1}, f, f_{a2}, f_{p1}
Характеристические сопротивления $Z_П$ и $Z_Т$	$Z_П$, Z_T, f	$Z_П$, $Z_Г$, f	$Z_П$, Z_T, f

f_{c1}	$f_{a2} - \frac{\Delta f}{1+K}$	f_{p1}	$f_0 - \frac{\Delta f}{\sqrt{1+K}}$
f_{c2}	f_{a2}	$f_{p1} + \frac{\Delta f}{1+K}$	$f_0 + \frac{\Delta f}{\sqrt{1+K}}$
$f_{\infty 1}$	$f \to \infty$	f_{a1}	f_{a1}
$f_{\infty 2}$	f_{p2}	$f \to 0$	f_{p2}
$Z_{\text{п}0}$	$\frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{C_1 C_{02}}} \frac{1+2K}{\sqrt{1+K}}$	$\frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{C_{01} C_2}} \frac{1}{\sqrt{1+K}}$	$\frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{C_{01} C_{02}}}$
$Z_{\text{т}0}$	$\frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{C_1 C_{02}}} \sqrt{1+K}$	$\frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{C_{01} C_2}} \frac{\sqrt{1+K}}{1+2K}$	
a при $f \to 0$	$\text{sh}\, a \approx \sqrt{K}$	∞	$\text{sh}\, a \approx \sqrt{K}$
a при $f \to \infty$	∞	$\text{sh}\, a \approx \sqrt{K}$	

При параллельном соединении резонатора с параметрами $f_р$, Δf, C_0 и конденсатора, имеющего емкость $C_к$, резонансная частота $f_р$ не изменяется, антирезонансная частота понижается, приближаясь к $f_р$, резонансный промежуток сужается до величины $\Delta f'$. Промежуток $\Delta f'$ можно вычислить по формуле

$$\Delta f' \approx \frac{C_0}{C_0 + C_к} \Delta f.$$

При последовательном соединении резонатора и конденсатора антирезонансная частота $f_а$ не изменяется, резонансная частота повышается, приближаясь к $f_а$, резонансный промежуток также сужается. Величина резонансного промежутка в этом случае вычисляется по формуле

$$\Delta f' \approx \frac{C_к}{C_0 + C_к} \Delta f.$$

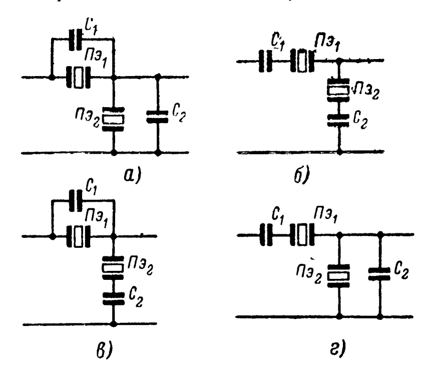


Рис. 17. Разновидности Г-образных звеньев, состоящих из резонаторов и конденсаторов.

а — параллельное соединение резонаторов и конденсаторов; *б* — последовательное соединение резонаторов и конденсаторов; *в* — параллельное соединение резонатора и конденсатора в последовательной ветви звена и последовательное соединение в параллельной ветви звена; *г* — последовательное соединение резонатора и конденсатора в последовательной ветви звена и параллельное соединение в параллельной ветви звена.

На рис. 18 приведены графики зависимости $\Delta f'/\Delta f$ от отношения $C_к/C_0$ для параллельного и последовательного соединений резонатора и конденсатора. По этим графикам нетрудно вычислить емкость $C_к$, необходимую для сужения резонансного промежутка Δf до величины $\Delta f'$.

Полная емкость ветви, состоящей из параллельно соединенных резонатора и конденсатора, равна $C_0 \dfrac{\Delta f}{\Delta f'}$, емкость ветви, состоящей из последовательно соединенных резонатора и конденсатора, равна $C_0 \dfrac{\Delta f'}{\Delta f}$. Обозначая через Δf_1, C_{01}, $C_{к1}$ резонансный промежуток, емкость резонатора и емкость конденсатора в последовательной ветви звена, а через Δf_2, C_{02} и $C_{к2}$ те же параметры в параллельной ветви звена, а также, полагая, как и прежде, $K = C_{02}/C_{01}$ и учитывая условия симметрии $\Delta f'_1 = \Delta f'_2 = \Delta f'$, можно записать отношения емкостей для звеньев:

для звена на рис. 17, *а* $K' = K \dfrac{\Delta f_2}{\Delta f_1}$;

для звена на рис. 17, *б* $K' = K \dfrac{\Delta f_1}{\Delta f_2}$;

для звена на рис. 17, *в* $K' = K \frac{(\Delta f')^2}{\Delta f_1 \Delta f_2}$;

для звена на рис. 17, *г* $K' = K \frac{\Delta f_1 \Delta f_2}{(\Delta f')^2}$.

Для звеньев на рис. 17,*а* и *б* отношение емкостей K' зависит от отношения резонансных промежутков резонаторов, устанавливаемых в ветвях; если эти промежутки равны, то отношение емкостей K' равно просто отношению емкостей резонаторов K. Для звена на рис. 17,*в* отношение емкостей всегда меньше, а для звена на рис. 17,*г* всегда больше отношения емкостей резонаторов. Соотношения для $\Delta f'$ и K' позволяют по приведенным выше формулам вычислить полосу пропускания, характеристические сопротивления и затухание для звеньев, состоящих из резонаторов и конденсаторов.

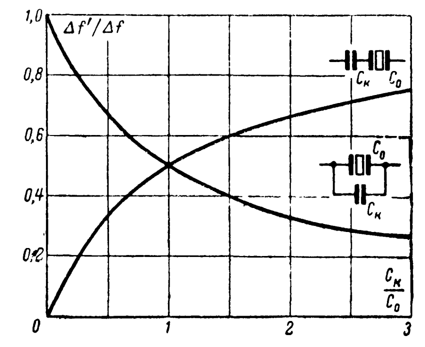


Рис. 18. График зависимости $\Delta f'/\Delta f$ от отношения емкостей $C_к/C_0$.

Приведем некоторые соображения, касающиеся применения рассмотренных схем. При выборе той или иной схемы следует учитывать особенности настройки. При параллельном соединении резонатора и конденсатора, механической обработкой резонатора настраивается резонансная частота, а подбором емкости конденсатора — антирезонансная частота. При последовательном соединении резонатора и конденсатора шлифовкой резонатора нужно подгонять антирезонансную частоту, а конденсатором — резонансную. Настройка резонансной частоты путем шлифовки осуществляется сравнительно легко. Что же касается антирезонансной частоты, то ее измерение часто осложняется влиянием монтажных емкостей, снижающих точность настройки. Поэтому схема звена на рис. 18,*а* наиболее удобна с точки зрения настройки фильтра. Тем не менее преимущества других схем и усовершенствования методики настройки могут повлиять на дальнейший выбор. Так, достоинством схемы на рис. 18,*г* является более простой монтаж элементов в конструкции фильтра. Кроме того, в этой схеме могут быть использованы резонаторы одного типоразмера, к тому же мало отличающиеся по резонансной частоте (в ряде случаев в пределах технологического разброса). Схема на рис. 18,*в* отличается тем, что частоты обоих полюсов затухания звена настраиваются с помощью конденсаторов, что позволяет изменять ширину полосы пропускания, не меняя настройки резонаторов. Кроме того, в этой схеме имеется определенная возможность компенсации температурного ухода частот полюсов затухания (а следовательно, и полосы пропускания) за счет выбора оптимальных величин емкости и температурных коэффициентов емкости применяемых конденсаторов. Схема на рис. 18,*б* не имеет заметных преимуществ перед другими схемами, хотя ее более высокое характеристическое сопротивление в некоторых случаях может оказаться полезным.

Рассмотренные выше схемы пьезокерамических фильтров состоят из отдельных элементов (пьезокерамических резонаторов и в некоторых случаях конденсаторов), электрически связанных между собой. Благодаря этому конструкции фильтров могут быть самыми разнообразными. Резонаторы могут компоноваться, образуя плоскую, прямоугольную, цилиндрическую и другие конструкции фильтров. Последние зависят не только от конструкции и размеров резонаторов и конденсаторов, но и от способа крепления и электрической коммутации этих элементов. В большинстве конструкций для крепления и электрического соединения элементов используются прижимные контактные шайбы или пластины.

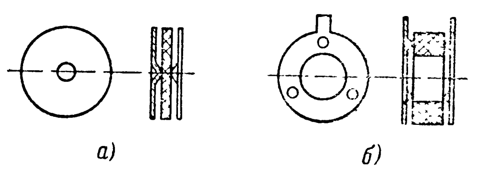


Рис. 19. Варианты расположения резонаторов и контактных шайб в конструкции фильтра.
а — для дискового резонатора: *б* — для кольцевого резонатора.

Дисковые резонаторы обычно устанавливаются в цилиндрическом канале изоляционного корпуса между шайбами с конусным выступом в центре (рис. 19,*а*). Кольцевые резонаторы оказалось возможным устанавливать между плоскими шайбами с точечными выступами (рис. 19,*б*). Контактные шайбы могут иметь лепестки для электрического соединения резонаторов в соответствии с монтажной схемой.

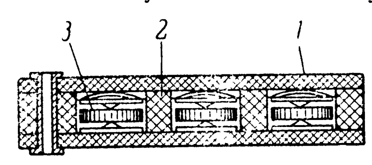


Рис. 20. Вариант плоской конструкции пьезокерамического фильтра.

Важным требованием к конструкции фильтров является уменьшение длины электрических соединений и экранировка ветвей фильтра, ограничивающая прохождение сигнала с входа на выход через побочные емкостные связи. Последнюю функцию в известной мере выполняют те контактные шайбы, которые в соответствии со схемой соединены с корпусом.

Рассмотрим некоторые варианты конструкции фильтров.

Отечественные пьезокерамические фильтры типов ПФ1П-1М и ПФ1П-2, выпускаемые промышленностью и предназначенные для использования в усилителях промежуточной частоты радиовещательных транзисторных приемников III—IV (ПФ1П-1М) и I—II классов (ПФ1П-2), имеют следующую конструкцию (рис. 20). Между двумя печатными платами *1* помещен пластмассовый сепаратор *2* с круглыми цилиндрическими отверстиями. В отверстия вкладываются дисковые резонаторы, контактные и пружинящие шайбы *3*. На печатных платах выполнены все необходимые соединения между резонаторами. Внешние стороны печатных плат металлизированы для экранирования фильтра. Пакет из плат и сепа-

Таблица 4

Технические данные	ПФ1П-1М	ПФ1П-2
Средняя частота полосы пропускания, *кгц*	465±2,5	
Нагрузочные сопротивления:		
$R_{вх}$	1,2 *ком*±15%	
$R_{вых}$	600 *ом*±15%	
Ширина полосы пропускания по уровню затухания 6 *дб*, *кгц*	6,5—10	8,5—12,5
Неравномерность затухания в полосе пропускания, *дб*	Не более 3	
Вносимое затухание, *дб*	Не более 12	
Затухание, *дб*:		
на частоте ±10 *кгц*	Не менее 41	Не менее 38
на частоте ±20 *кгц*	Не менее 40	Не менее 38
Интервал рабочих температур, °С	От —10 до+50	

ратора соединяется с помощью заклепок, к нему подсоединяются проволочные выводы и готовый фильтр запрессовывается в пластмассовый корпус.

Схема фильтра показана на рис. 2, а в табл. 4 приведены основные технические данные фильтров ПФ1П-1М и ПФ1П-2.

Как отмечалось выше, для частот 450—470 *кгц* дисковые резонаторы должны иметь диаметр 5—5,5 *мм*. Разная величина емкости резонаторов, размещаемых в последовательных и параллельных ветвях фильтра, обеспечивается за счет различной площади электродов и толщины дисков.

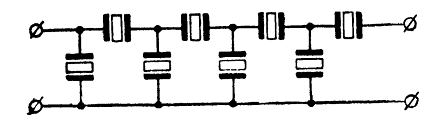


Рис. 21. Электрическая схема 8-резонаторного лестничного пьезокерамического фильтра.

Достоинством рассматриваемой плоской конструкции фильтра является простота сборки и малое число паяных соединений (припаиваются только выводы фильтра). Недостатком конструкции являются бо́льшие по сравнению с цилиндрическим вариантом размеры (габаритные размеры этих фильтров 37×24×11 *мм*, объем 9,7 *см*³, вес 10 *г*).

В цилиндрической конструкции фильтра пакет из резонаторов, контактных и изоляционных шайб размещается в цилиндрическом канале изоляционного корпуса, снабженном продольной прорезью, в которой помещаются лепестки контактных шайб. Весь пакет поджимается пружиной. Электрические соединения между резонаторами осуществляются с помощью проволочных перемычек, припаиваемых или привариваемых к лепесткам контактных шайб. Собранный фильтр закладывается в металлический кожух-экран.

Цилиндрическую конструкцию имеют пьезокерамические фильтры, выпускаемые фирмами Браш (Англия) и Кливайт (США).

Таблица 5

Технические данные	TL-2D5A	TL-10D18A	TL-45D60A
Средняя частота полосы пропускания, *кгц*	455±1	455±1	455±2
Нагрузочные сопротивления $R_{вх}$ и $R_{вых}$, *ком*	1,5	1,5	1,2
Ширина полосы пропускания по уровню затухания 6 *дб*, *кгц*	2	10	45
Неравномерность затухания в полосе пропускания, *дб*	<3	<3	<3
Вносимое затухание, *дб*	15	7	4
Затухание в полосе задерживания, *дб*	>60	>60	>60
Коэффициент прямоугольности по уровням затухания 6 и 60 *дб*	2,6	1,8	1,34
Диапазон рабочих температур, °С	От —40 до +85		

Фильтры имеют следующие размеры: длина 39 *мм*, диаметр 7,8 *мм* и объем около 2 *см*^{3}. Основные технические данные некоторых типов фильтров приведены в табл. 5.

Следует заметить, что для получения параметров, отмеченных в таблице, фильтры должны содержать до 15—19 резонаторов, тогда как в фильтрах ПФ1П-1М и ПФ1П-2 их 8.

Пример конструкции фильтра с кольцевыми резонаторами на частоты 1—3 *Мгц* показан на рис. 22. Кольцевые резонаторы, конденсаторы, контактные и изоляционные шайбы собирают последо-

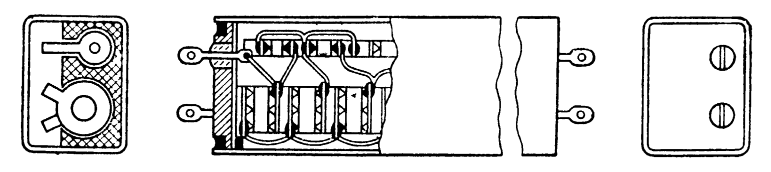


Рис. 22. Вариант конструкции фильтра с кольцевыми резонаторами и конденсаторами.

вательно в двух цилиндрических каналах прямоугольного изоляционного корпуса и поджимают цилиндрическими пружинами. В большом канале расположены резонаторы и конденсаторы параллельных ветвей фильтра, а в малом канале — последовательных.

Конденсаторам, размещаемым вместе с резонаторами в канале изоляционного корпуса, целесообразно придать форму кольца или диска. Наиболее удобно, если конденсаторы имеют ту же форму и те же диаметры, что и резонаторы. Тогда конденсаторы могут изготавливаться из конденсаторной керамики в тех же формах, что и резонаторы, а для их электрического монтажа используются те же контактные шайбы. Различная величина емкости конденсаторов получается за счет шлифовки по толщине.

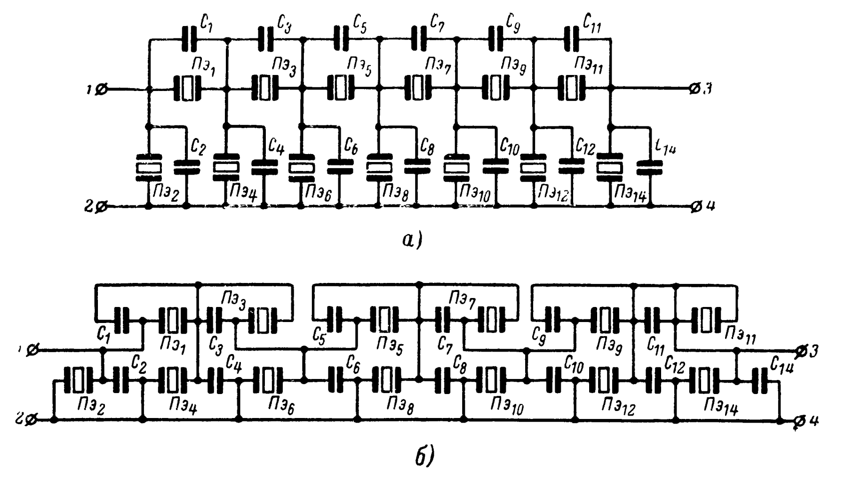


Рис. 23. Принципиальная электрическая (*а*) и монтажная (*б*) схемы 13-резонаторного пьезокерамического фильтра, построенного на основе звеньев, показанных на рис. 17,*а*.

Изоляционный корпус с двумя пакетами резонаторов вставляется в скобу с двумя основаниями, содержащими потенциальные и корпусные выводы фильтра. Электрический монтаж производится при помощи тонкой медной луженой проволоки диаметром 0,1—0,15 *мм*, припаиваемой к выступам контактных шайб. Смонтирован-

Таблица 6

	Фильтр на частоту 1 600 *кгц*	Фильтр на частоту 2 000 *кгц*
Средняя частота полосы пропускания, *кгц*	1 600	2 000
Ширина полосы пропускания по уровню затухания 6 *дб*, *кгц*	65	40
Нагрузочные сопротивления $R_{вх}$ и $R_{вых}$, *ком*	2,5	2,0
Неравномерность затухания в полосе пропускания, *дб*	<3	<3
Вносимое затухание, *дб*	<6	<8
Затухание в полосе задерживания, *дб*	>60	>60
Коэффициент прямоугольности по уровням затухания 6 и 60 *дб*	1,4	1,5

ный и проверенный фильтр вставляется в прямоугольный металлический кожух-экран и герметично запаивается по периметру каждого основания.

На рис. 23 показана принципиальная (*а*) и монтажная (*б*) схемы 13-резонаторного фильтра, а в табл. 6 приведены примерные технические данные фильтров на частоты 1 600 и 2 000 *кгц*. Эти фильтры имеют размеры 40×11×9 *мм*, объем около 4 $см^3$ и вес 12 *г*.

Как видно из приведенных данных, применение конденсаторов специальной конструкции (в данном случае кольцевых) существенно не усложнило конструкцию фильтра и позволило сохранить малые габариты.

Рассмотренные варианты конструкций фильтров являются, естественно, лишь примерами. Вполне осуществимы вертикальные либо, наоборот, очень плоские компоновки.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ

В последние годы внимание разработчиков все больше привлекают конструкции фильтров, в которых применяется механическая связь между резонаторами. Серьезные успехи были достигнуты в разработке электромеханических полосовых фильтров с магнитострикционными преобразователями, где получены высокоселективные и стабильные характеристики на частотах до 500—800 *кгц*. Однако, как упоминалось выше, из-за сложности и высокой стоимости изготовления электромеханические фильтры применяются главным образом в профессиональной аппаратуре. Для массовой аппаратуры большой интерес представляют пьезокерамические фильтры с механическими связями, которым свойственны все преимущества, вытекающие из керамической технологии изготовления. Ниже мы рассмотрим некоторые конструкции таких фильтров.

Выше рассматривались дисковые резонаторы, работающие на частоте первого обертона радиальных колебаний. Дисковый резонатор, имеющий разделенные электроды на одной стороне диска (центральный и кольцевой) и общий электрод на другой стороне, получил название «трансфильтр». Трансфильтр можно рассматривать как систему из двух пьезокерамических резонаторов (точечного и кольцевого) с сильной механической связью. Благодаря различию в площади электродов входное и выходное сопротивления трансфильтра различны, что позволяет его использовать в качестве селективного согласующего элемента межкаскадной связи.

На рис. 24 показаны конструкция, графическое обозначение и эквивалентная электрическая схема трансфильтра (с учетом сопротивлений генератора и нагрузки). На эквивалентной схеме обозначены: $R_г$ и $R_н$ — сопротивления генератора и нагрузки; $C_ц$ и $C_к$ — входная и выходная эквивалентные статические емкости со стороны центрального и кольцевого электродов; L, C и R — эквивалентные параметры механической колебательной системы; $L_т$ — трансформаторный эквивалент механической связи с коэффициентом трансформации $n \approx \frac{C_к}{C_ц} \approx \frac{C_{вых}}{C_{вх}}$,

где $C_{вх}$ и $C_{вых}$ — входная и выходная емкости трансфильтра, измеренные на низкой частоте при замкнутых накоротко выходных и входных зажимах, соответственно.

Трансфильтр применяется в большинстве случаев либо в режиме высоких нагрузочных сопротивлений, при которых

$$R_г \gg \frac{1}{2\pi f_0 C_ц} \quad и \quad R_н \gg \frac{1}{2\pi f_0 C_к},$$

либо в режиме высокого сопротивления нагрузки на входе $\left(R_г \gg \frac{1}{2\pi f_0 C_ц}\right)$ и низкого сопротивления нагрузки на выходе $\left(R_н \ll \frac{1}{2\pi f'_0 C_к}\right)$. Средние частоты f_0, f'_0 и ширина полосы про-

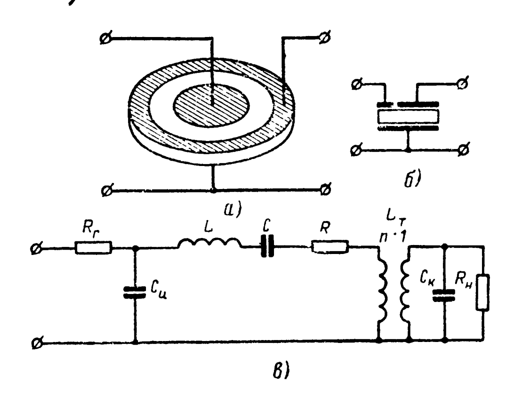


Рис. 24. Конструкция (*а*), графическое обозначение (*б*) и эквивалентная электрическая схема (*в*) трансфильтра.

пускания трансфильтра изменяются в зависимости от режима работы. В табл. 7 приведены параметры двух типов трансфильтров (для работы в первом и во втором режимах), рассчитанных на включение между транзисторными каскадами. Трансфильтры изготовлены из материала PZT-6A.

В отличие от звена лестничного фильтра, состоящего из двух резонаторов с электрической связью, характеристика трансфильтра

Таблица 7

Параметры	Режимы работы	
	I	II
Диаметр диска, *мм*	13,5	13,5
Толщина диска, *мм*	0,4	0,75
Средняя частота, *кгц*	465	465
Ширина полосы пропускания $\Delta f_б$, *кгц*	11,6	25,6
Входная емкость $C_{вх}$, *пф*	480	180
Выходная емкость $C_{вых}$, *пф*	2 650	800
Сопротивление генератора $R_г$, *ком*	3,9—15	2
Сопротивление нагрузки $R_н$, *ком*	0,68—3	0,3
Затухание в полосе пропускания, *дб*	3	2

аналогична характеристике обычного электрического контура с высокой добротностью. Из таблицы видно, что в трансфильтрах наряду с селективными свойствами достигается 5—7-кратная трансформация сопротивлений.

Другим очень интересным примером элемента частотной селекции является электромеханический фильтр с пьезокерамическими преобразователями, имеющий форму буквы Н и поэтому названный Н-фильтр. Н-фильтр представляет собой металлическую пластину Н-образной формы, на которую с помощью эпоксидной смолы наклеены пьезокерамические преобразователи, как показано на рис. 25. Резонирующая пластинка изготовлена из сплава типа «элинвар», обеспечивающего малую зависимость частоты от температуры.

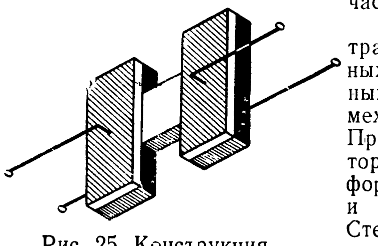


Рис. 25. Конструкция Н-фильтра.

Колебательная система Н-фильтра представляет собой пару составных резонаторов-брусков с продольными колебаниями по длине бруска, механически связанных между собой. При резонансных колебаниях резонаторов связка испытывает сложные деформации, включающие растяжение и сжатие по длине и по ширине. Степень связи зависит от длины, ширины и толщины связки (перемычки между резонаторами).

Характеристика Н-фильтра аналогична характеристике трансфильтра. Один из вариантов конструкции Н-фильтра имел следующие параметры: средняя частота 455 *кгц*, ширина полосы пропускания по уровню затухания 3 *дб* около 6 *кгц*, затухание в полосе пропускания не более 2 *дб*, затухание при расстройке на ± 10 *кгц* около 25 *дб*. Размеры фильтра (без корпуса) составляют примерно $5{,}1 \times 5{,}1 \times 0{,}8$ *мм*.

Н-фильтр можно изготовить целиком из пьезокерамического материала, и технологически такой фильтр много проще рассмотренного. Однако по стабильности он хуже фильтра с металлическими резонаторами.

Н-фильтры и трансфильтры нашли применение в некоторых образцах зарубежной радиоаппаратуры и, в частности, в трактах промежуточной частоты малогабаритных транзисторных приемников. Вместе с тем избирательные свойства этих фильтров недостаточны для высококачественной аппаратуры. Чтобы получить более высокую избирательность, в ряде случаев применяется несколько таких фильтров в различных каскадах приемников. Известны также многозвенные фильтры, представляющие собой электрическое каскадное соединение Н-фильтров или трансфильтров. В этих конструкциях часто применяются элементы связи — конденсаторы или резонаторы. Используя в качестве элементов связи специальные конструкции керамических конденсаторов, можно создать компактные и достаточно миниатюрные конструкции фильтров.

Отечественной промышленностью разработаны многозвенные пьезомеханические фильтры, представляющие собой каскадное соединение звеньев, каждое из которых состоит из двух дисковых пьезокерамических резонаторов и расположенной между ними механической связки в виде диска меньшего диаметра. Резонаторы и связка сжаты совместно в металлической обойме. Эти фильтры

Таблица 8

Данные	Однозвенный фильтр	Двухзвенный фильтр
Средняя частота полосы пропускания, *кгц*	465±2	465±2
Полоса пропускания по уровню затухания 6 *дб, кгц*	11,5±2,5	11,5±2,5
Вносимое затухание, *дб*	<3,5	<7
Неравномерность затухания в полосе пропускания, *дб*	1	2
Затухание в полосе задерживания, *дб*	>20	>40
Сопротивления нагрузки:		
$R_{вх}$, *ком*	2±0,2	2±0,2
$R_{вых}$, *ком*	1±0,1	1±0,1
Объем, *см*^{3}	0,5	0,9

предназначены для использования в трактах УПЧ транзисторных радиоприемников и рассчитаны на частоту 465 *кгц*. По уровню затухания 6 *дб* они имеют полосу пропускания 8,5, 11,5, 18 или 25 *кгц*. В табл. 8 приведены технические данные для одно- и двухзвенного вариантов фильтров с полосой пропускания 11,5 *кгц*. Фильтры рассчитаны на диапазон рабочих температур от —40 до +70° С. Они выполнены в цилиндрической конструкции диаметром 8 *мм* и длиной 10 и 18 *мм*. Как видно из приведенных данных, фильтры обладают хорошими характеристиками при малых размерах.

Наиболее перспективными являются цельнокерамические конструкции фильтров, которые представляют собой многозвенные системы с механическими связками между резонаторами и пьезокерамическими преобразователями на входе и выходе. Примером такой системы может быть многозвенная конструкция, подобная конструкции Н-фильтра, но изготовленная (отлитая или прессованная) целиком из пьезокерамического материала. Подобные системы, изготовленные из одной пластинки кварца (цельнокристаллические фильтры), были описаны в литературе, однако они отличаются сложностью и высокой стоимостью изготовления.

Изготовление цельнокерамических фильтров существенно проще, чем цельнокристаллических, однако их разработка требует решения таких вопросов, как получение моночастотной характеристики в широком диапазоне частот ниже и выше полосы пропускания, разработка способов настройки, соединение колебательной системы с корпусом и др.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ И ФИЛЬТРОВ

Рассмотрим некоторые, наиболее простые случаи применения пьезокерамических резонаторов и фильтров в радиотехнических схемах.

Пьезокерамические резонаторы могут найти применение в генераторах синусоидальных колебаний в тех случаях, когда требования к стабильности частоты не очень высоки. На рис. 26 показана про-

стая схема транзисторного генератора, в которой используется пьезокерамический резонатор. В этой схеме напряжение обратной связи снимается с эмиттера транзистора, работающего в схеме с общим коллектором, и через резистор R_3 подается на делитель напряжения, образованный конденсаторами C_1 и C_2. Рабочая точка транзистора устанавливается с помощью делителя напряжения на

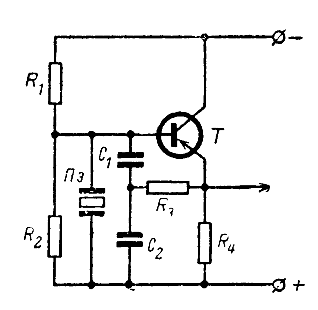


Рис. 26. Схема транзисторного генератора с пьезокерамическим резонатором и включением транзистора по схеме с общим коллектором.

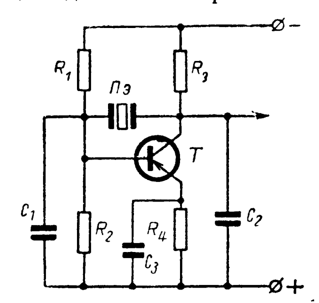


Рис. 27. Схема транзисторного генератора с пьезокерамическим резонатором и включением транзистора по схеме с общим эмиттером.

резисторах R_1 и R_2 и благодаря сильной обратной связи по постоянному току, определяемой сопротивлением резистора в цепи эмиттера R_4, мало зависит от изменения температуры и разброса параметров транзистора.

Генератор работает на частоте, лежащей между резонансной и антирезонансной частотами резонатора. Частота генерации $f_г$ приближенно определяется из выражения

$$f_г = f_р + \frac{C_0}{C_0 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \Delta f,$$

где C_0 — статическая емкость, $f_р$ — резонансная частота, Δf — величина резонансного промежутка резонатора.

Наибольшая амплитуда выходного напряжения, при малых искажениях формы сигнала получается при отношении емкостей $C_1/C_2 = 5 \div 10$.

Другая схема генератора показана на рис. 27. В этой схеме напряжение обратной связи снимается с коллектора транзистора. Для частоты генерации и емкостей конденсаторов делителя C_1 и C_2 справедливы указанные выше соотношения.

В генераторных схемах можно использовать не только резонаторы, но и трансфильтры. На рис. 28 показана схема генератора с трансфильтром, в которой напряжение обратной связи снимается с коллектора транзистора. Сопротивление резистора R_5 в цепи эмиттера способствует стабилизации рабочей точки транзистора.

Основное применение пьезокерамические резонаторы и фильтры находят в избирательных усилителях, главным образом в усилителях промежуточной частоты радиоприемников.

Одиночный пьезокерамический резонатор можно включить в цепь эмиттера усилительного каскада, как показано на рис. 29,*а*. На резонансной частоте резонатора резистор R_4 оказывается шунти-

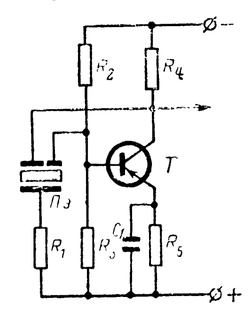


Рис. 28. Схема транзисторного генератора с трансфильтром.

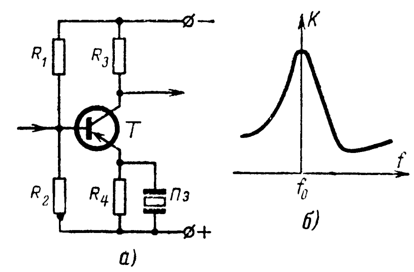


Рис. 29. Схема избирательного усилителя с пьезокерамическим резонатором в качестве селективного элемента (*а*) и его частотная характеристика (*б*).

рованным по переменному току малым сопротивлением резонатора. При этом усиление каскада возрастает. На частотах, удаленных от резонансной, резистор R_4 шунтируется емкостью резонатора, которая определяет величину обратной связи. Частотная характеристика этого каскада показана на рис. 29,*б*. Она напоминает характеристику колебательного контура. Присоединяя конденсатор параллельно резонатору, можно несколько изменять ширину полосы пропускания каскада.

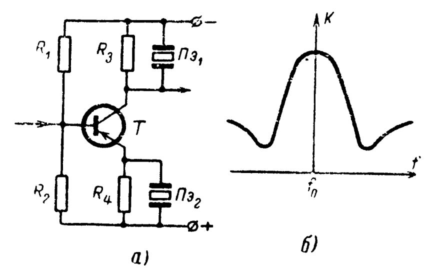


Рис. 30. Схема избирательного усилителя с двумя пьезокерамическими резонаторами в цепях коллектора и эмиттера транзистора (*а*) и его частотная характеристика (*б*).

Для улучшения избирательных свойств каскада наряду с резонатором, включенным в цепь эмиттера, можно включить резонатор на выходе каскада, как показано на рис. 30,*а*. Резонатор, включенный в цепь коллектора транзистора, также придает каскаду частотно-избирательные свойства. В этом случае наибольшее усиление достигается на антирезонансной частоте резонатора. Если антирезонансная частота резонатора $П_{э1}$ совпадает с резонансной частотой резонатора $П_{э2}$, то частотная характеристика каскада принимает вид, показанный на рис. 30,*б*. По своей форме она напоминает характеристику звена полосового фильтра. Полоса пропускания каскада с двумя резонаторами расширяется, а на частотной характеристике возникают два полюса затухания, расположенные по обе стороны от полосы пропускания. Аналогичную характеристику можно получить, включая резонатор $П_{э1}$ не в коллекторную цепь транзистора, а на входе каскада, как показано на рис. 31.

В избирательных усилителях успешно применяются не только резонаторы, но и трансфильтры. Трансфильтр включается обычно по схеме, показанной на рис. 32. При использовании трансфильтра выходное сопротивление предыдущего каскада и входное сопротивление последующего должны быть согласованы с параметрами трансфильтра. Избирательные свойства схемы с трансфильтром можно усилить, если одновременно включить резонатор в эмиттерную цепь транзистора, как показано на рис. 32 пунктиром.

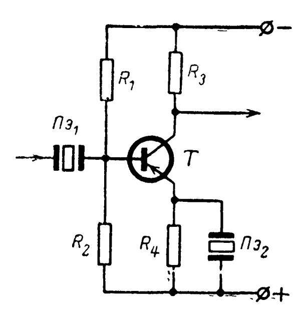


Рис. 31. Схема избирательного усилителя с двумя пьезокерамическими резонаторами в цепях базы и эмиттера транзистора.

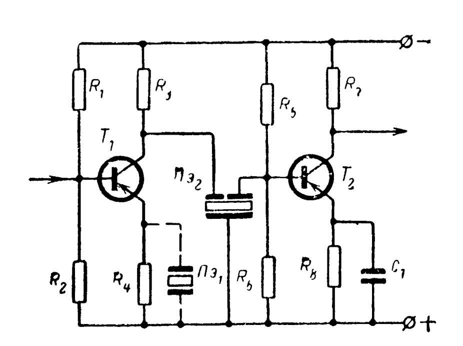


Рис. 32. Схема избирательного усилителя с трансфильтром.

Трансфильтр можно применить в усилителях промежуточной частоты радиоприемников, предназначенных для приема как сигналов с амплитудной модуляцией, так и частотно-модулированных сигналов в диапазоне УКВ. В этом случае усилитель промежуточной частоты должен усиливать как АМ-сигнал на частоте 450—470 *кгц*, так и ЧМ-сигнал на частоте 6—10 *Мгц*. Трансфильтр на частоту 450—470 *кгц* можно включить между контурами электрического фильтра ПЧ частотно-модулированного сигнала, как показано на рис. 33. Как видно из рисунка, контуры электрического фильтра включены последовательно с трансфильтром. На низкой промежуточной частоте АМ-сигнала они имеют небольшое сопротивление и не препятствуют работе трансфильтра. На высокой промежуточной частоте ЧМ-сигнала входное и выходное емкостные сопротивления трансфильтра малы и лишь шунтируют цепи питания, не нарушая избирательных свойств схемы. Схема работает без переключения фильтров.

Как видно из приведенных примеров, схемы с пьезокерамическими резонаторами и трансфильтрами просты и экономичны в отношении числа элементов.

Пьезокерамические резонаторы и трансфильтры обычно разрабатываются с учетом условий согласования, типичных для транзисторных схем. Если даже непосредственное включение этих элементов не вполне соответствует условиям согласования, то благодаря малым потерям в ряде случаев допустимо выполнение условий согласования за счет дополнительных активных сопротивлений, включаемых последовательно или параллельно этим элементам.

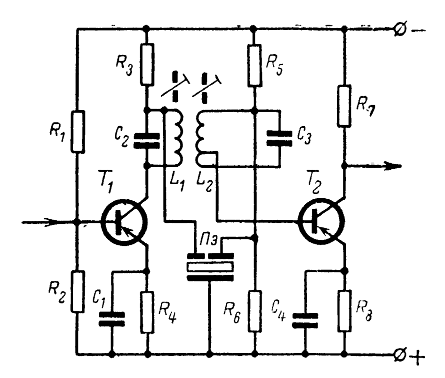


Рис. 33. Схема усилителя промежуточной частоты АМ- и ЧМ-сигнала с трансфильтром.

В других случаях для обеспечения согласования целесообразно повысить входное сопротивление каскада введением обратной связи.

Применение многозвенных пьезокерамических фильтров в трактах промежуточной частоты радиоаппаратуры не отличается какими-либо особенностями. С точки зрения включения фильтров основное отличие от электрических контуров и ФСС состоит в том, что пьезокерамические фильтры, как и трансфильтры, не пропускают постоян-

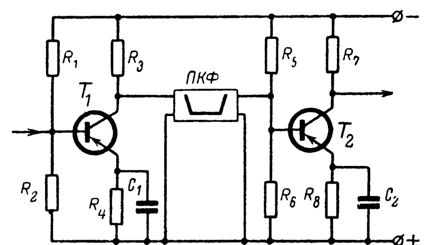


Рис. 34. Схема избирательного усилителя с пьезокерамическим фильтром (нагрузочные сопротивления фильтра соответствуют выходному и входному сопротивлениям каскадов).

ную составляющую тока и поэтому включаются только параллельно. Правда, в некоторых случаях в конструкцию фильтров вводятся согласующие трансформаторы на ферритовых кольцах или сердечниках и тогда фильтры могут включаться последовательно в цепь питания каскада.

В большинстве случаев нагрузочные сопротивления пьезокерамических фильтров (ПКФ) соответствуют выходным и входным сопротивлениям транзисторных каскадов. Тогда фильтр включается по схеме рис. 34. В тех случаях, когда фильтр должен иметь высокое входное нагрузочное сопротивление, значительно превышающее по величине допустимое сопротивление в цепи коллектора, вместо

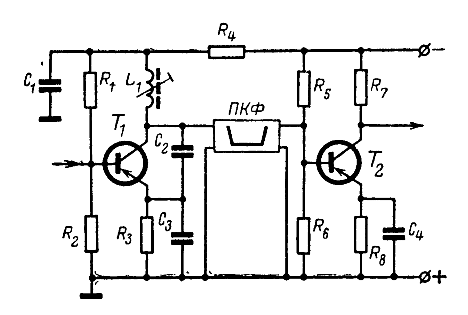


Рис. 35. Схема избирательного усилителя с пьезокерамическим фильтром и настроенным контуром в цепи коллектора транзистора (входное сопротивление фильтра превышает допустимое сопротивление в цепи коллектора транзистора).

резистора целесообразно использовать настроенный контур, как показано на рис. 35. Если применение контура нежелательно, то на входе фильтра последовательно включается резистор (R_5 на рис. 36). Когда сопротивление нагрузки на входе фильтра должно

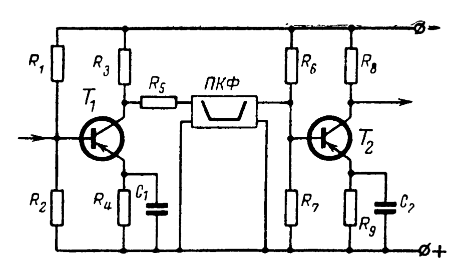


Рис. 36. Схема избирательного усилителя с пьезокерамическим фильтром (фильтр имеет высокое входное сопротивление и согласован с выходным сопротивлением каскада с помощью последовательно включенного резистора R_5).

быть малым, можно использовать эмиттерное включение фильтра, как показано на рис. 37. Аналогичные приемы согласования применяются на выходе фильтра.

Кроме рассмотренных случаев применения пьезокерамических резонаторов и фильтров, целесообразно упомянуть об их использовании во входных цепях радиоприемников и схемах частотного детектирования.

Пьезокерамические резонаторы можно применять в качестве фильтра-пробки, включенного последовательно с входными конту-

рами (тогда подавляемая частота должна быть равна антирезонансной частоте резонатора) или параллельно входному контуру (в этом случае подавляемая частота должна совпадать с резонансной частотой резонатора).

В радиоприемниках, рассчитанных на прием станций на фиксированных частотах, возможно применение резонаторов и фильтров в качестве входных контуров. При этом также можно использовать как параллельный, так и последовательный резонансы резонатора.

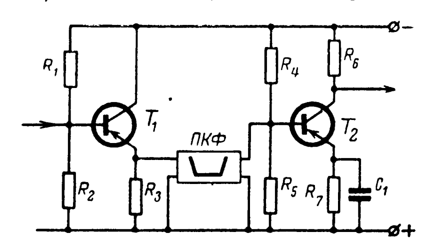


Рис. 37. Схема избирательного усилителя с пьезокерамическим фильтром (фильтр имеет низкое входное сопротивление).

Пьезокерамические резонаторы нетрудно применить в схемах частотных детекторов. Простая схема частотного детектора с одним резонатором показана на рис. 38,*а*.

На частоте

$$f_0 = f_p \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_1}} \approx f_p + \frac{C_0}{C_0 + C_1} \Delta f$$

полное сопротивление резонатора равно сопротивлению конденсатора C_1, при этом напряжения на обоих диодах равны по величине и

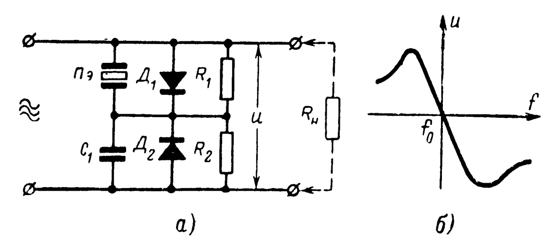


Рис. 38. Схема частотного детектора с пьезокерамическим резонатором (*а*) и его частотная характеристика (*б*).

противоположны по знаку, а следовательно, выходное напряжение равно нулю. На частоте более низкой, чем f_0, сопротивление резонатора уменьшается, а напряжение на выходе схемы становится положительным; на частоте более высокой, чем f_0, сопротивление резонатора возрастает, а напряжение на выходе схемы становится отрицательным. Частоту f_0 можно менять в некоторых пределах (от f_p до f_a) за счет изменения емкости конденсатора.

Частотная характеристика детектора приведена на рис. 38,*б*. Она почти симметрична относительно частоты f_0, если емкость конденсатора C_1 близка по величине к статической емкости резонатора C_0. Допустимая девиация частоты составляет примерно $(0,3 \div 0,4) \Delta f$. Путем правильного выбора температурного коэффициента емкости конденсатора C_1 можно повысить стабильность этой схемы в диапазоне температур. Более высокую симметрию и линейность характеристики можно получить в схеме, в которой конденсатор C_1 заменен вторым пьезокерамическим резонатором, у которого резонансная частота совпадает с антирезонансной частотой первого резонатора.

В заключение следует упомянуть, что пьезокерамические резонаторы и фильтры могут применяться в профессиональной связной аппаратуре, например в блоках формирования опорных частот, а также в телеметрической, измерительной и других видах аппаратуры.

Литература

Кэди У., Пьезоэлектричество и его практические применения, Изд-во иностр. лит., 1949.

Мэзон У., Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике, Изд-во иностр. лит., 1952.

Магнитные и диэлектрические приборы, под. ред. Г. Катца, т. I, II, «Энергия», М. — Л., 1964.

Физическая акустика, под. ред. У. Мэзона, т. I—А, «Мир», 1966.

Глозман И. А., Пьезокерамические материалы в электронной технике, «Энергия», 1965.

Грибовский П. О., Горячее литье керамических изделий, Госэнергоиздат, 1961.

Великин Я. И., Гельмонт З. Я., Зелях Э. В., Пьезоэлектрические фильтры, «Связь», 1966.

Босый Н. Д., Электрические фильтры, Гостехиздат УССР, 1959.

Глозман И. А., Пьезокерамика, М., «Энергия», 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 11 коп.